

Conception de structures composites : un cheminement par les algorithmes d'optimisation

François-Xavier Irisarri¹, Rodolphe Le Riche^{2,3}

¹ ONERA, Dept Matériaux et Struct. Composites

² CNRS LIMOS

³ Ecole des Mines de Saint-Etienne

Journée "Optimisation Topologique et Composites"
SIA, 24 Avril 2013

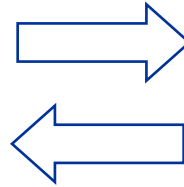
Optimisation et conception des structures composites

Constat : fabrication & conception composites basées sur savoir-faire individuels

Enjeux : apporter plus-value scientifique dans la démarche de conception
Démontrer l'apport de méthodes avancées sur des problèmes concrets

« Théorie des composites »

Méthodes avancées d'optimisation
Modélisation des procédés



« Métier des composites »

Conception
Contraintes de fabrication
Interprétation des design



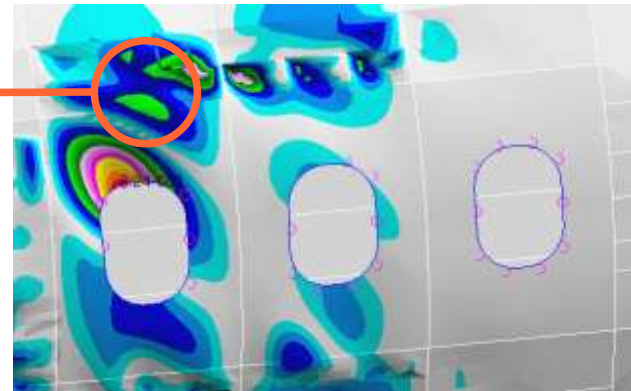
Problématique de l'optimisation de structures composites

Parmi les plus beaux problèmes d'optimisation :

- Matériaux architecturés → **espace de conception de grande taille**
- Comportements mécaniques multi-échelles (e.g., délaminage)
 - **complexité des critères mécaniques**
 - **multiplicité des représentations des solutions**
- Couplage entre la conception et la fabrication
 - **espace de conception combinatoire**
 - **contraintes de fabrication complexes**
- Possibilités d'intégration de fonctions à l'échelle structurale.



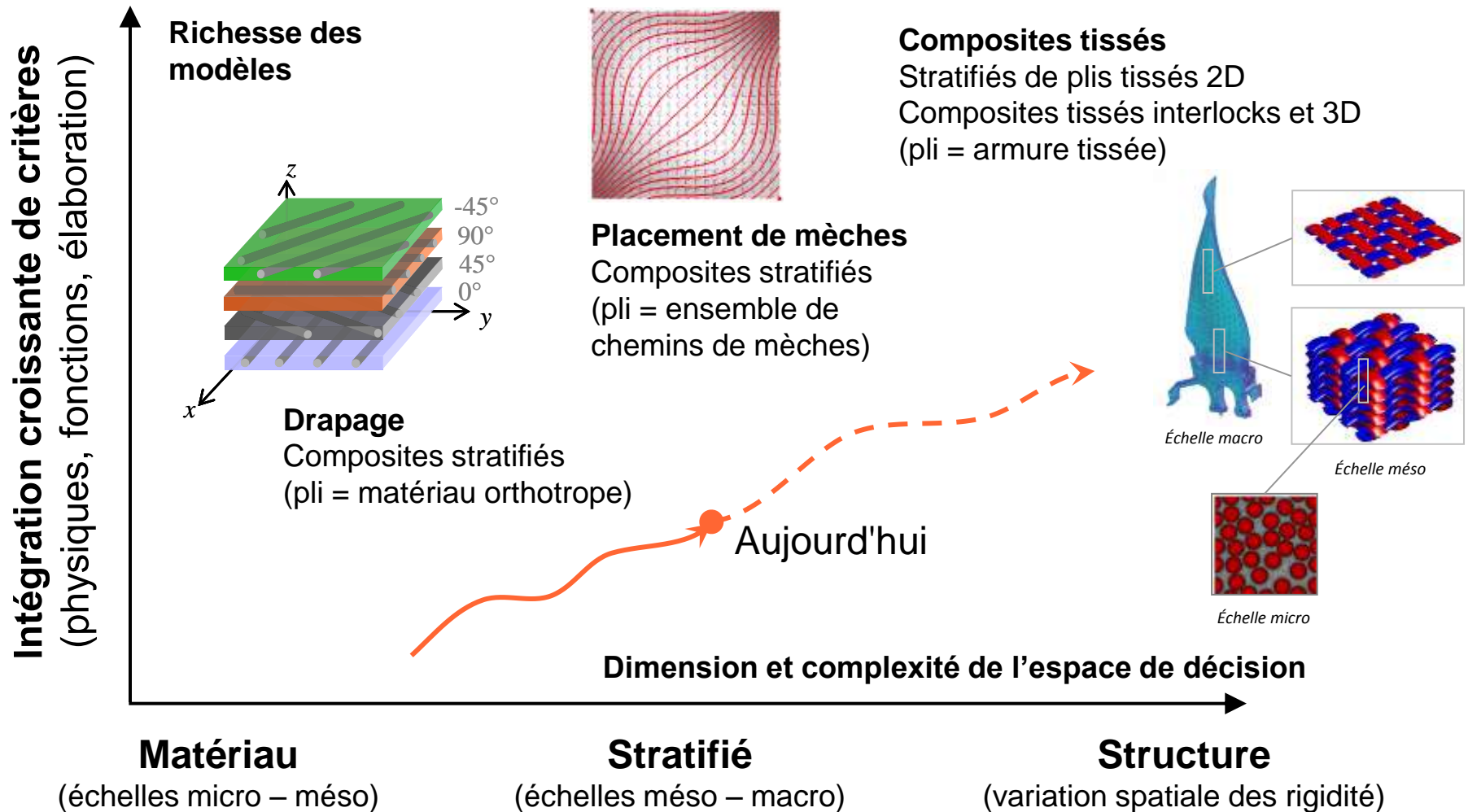
Préforme tissée 2D (taffetas)



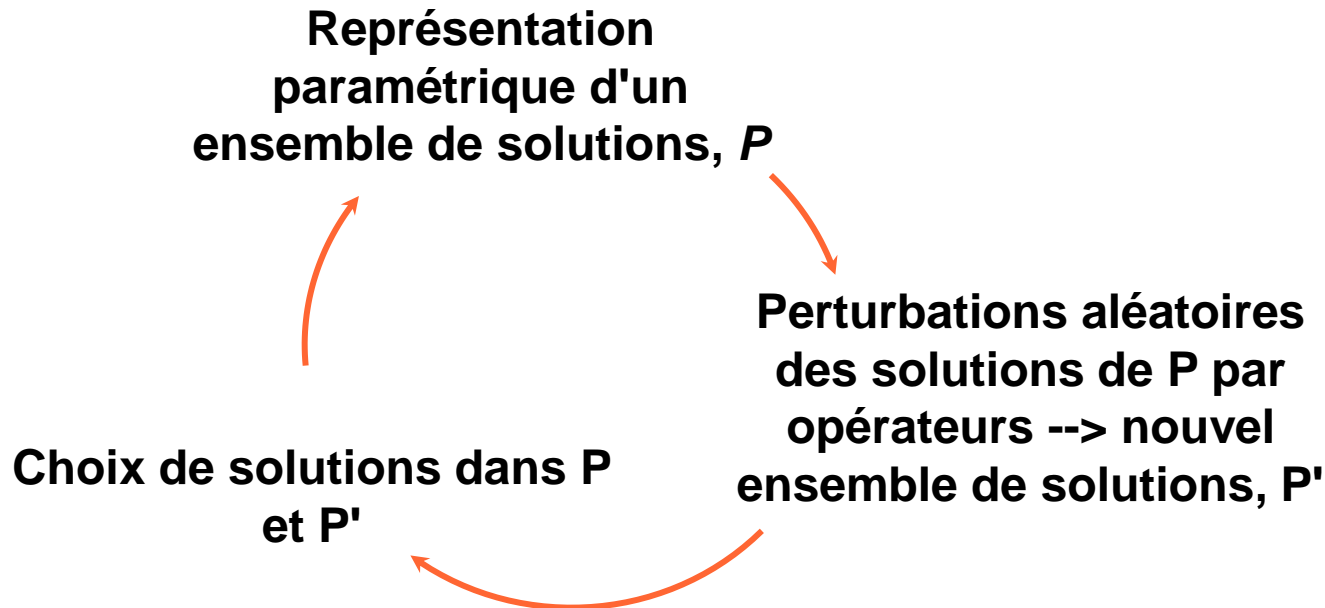
Simulation de flambement de fuselage avion composite (projet Maaximus)

Roadmap

Notre cheminement à travers les algorithmes d'optimisation



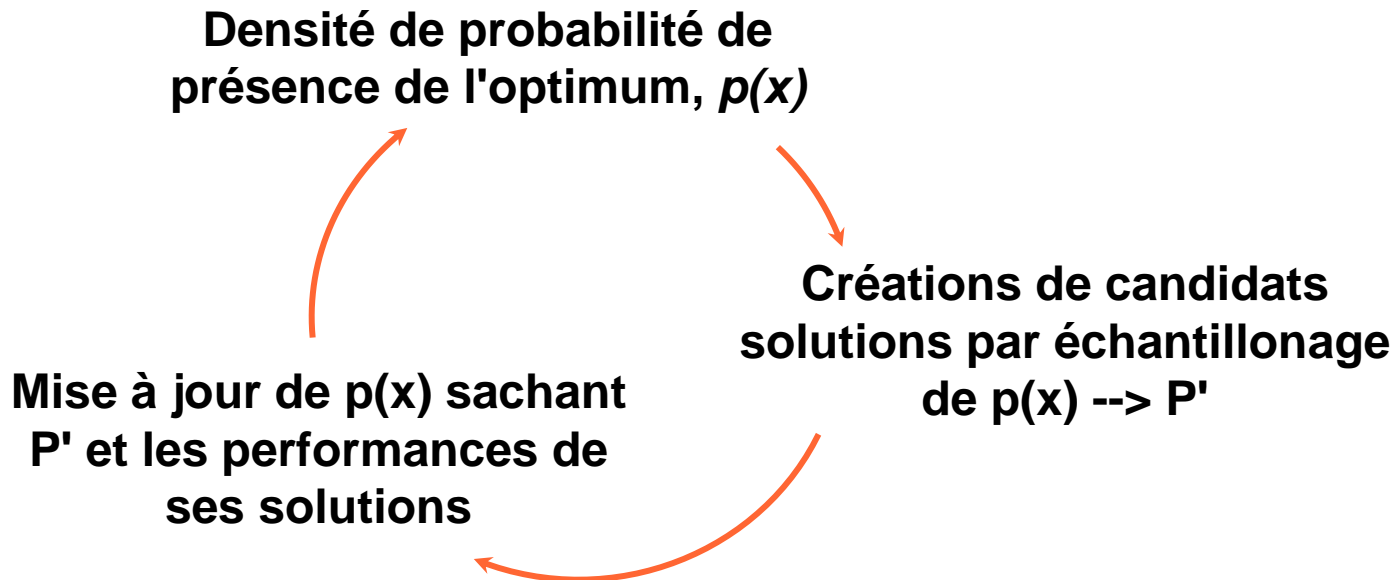
Optimisation stochastique de composites : algorithmes implicites ou évolutionnaires



Avantage : règles de conception peuvent être explicitement prises en comptes dans les opérateurs

Opérateurs : satisfont les principes de *respect* (transmission de caractéristiques communes), d'*ergodicité* (tout point de l'espace peut être atteint) et de *non biais*.

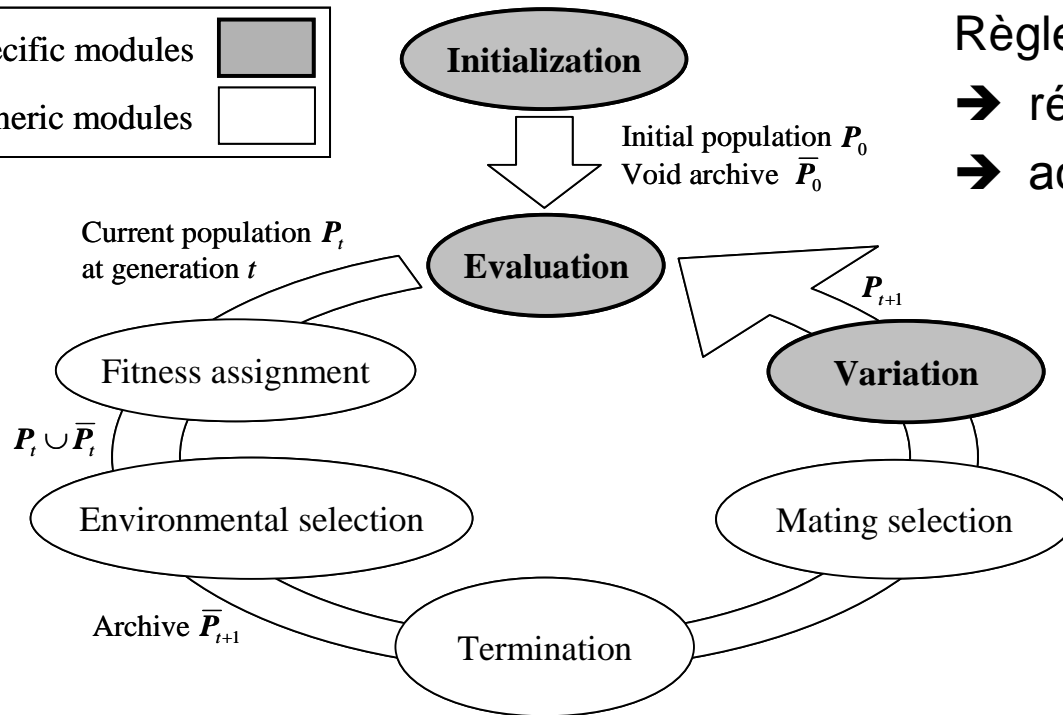
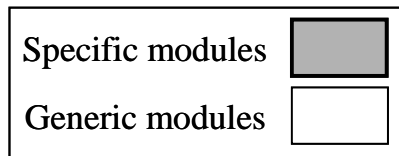
Optimisation stochastique de composites : algorithmes explicites ou EDAs



Avantage : cadre probabiliste permet de mieux comprendre (mathématiquement) l'algorithme.

Approche évolutionnaire à l'échelle du stratifié

Optimisation par Algorithme Évolutionnaire : ingénierie des opérateurs



Règles « métier composite »

➔ réduire domaine de recherche

➔ accélérer l'optimisation

Les opérateurs vérifient
les règles de conception

➔ opérateurs spécifiques
par technologie

[Irisarri, Thèse de doctorat, 2009 ; Irisarri *et al.* Composites Science and Technology, 2009 ; Irisarri *et al.* Composite Structures, 2011]

[Le Riche, HDR, 2008 ; Le Riche and Haftka, Improved genetic algorithm for minimum thickness composite design, Comp. Eng, 1995]

Approche évolutionnaire à l'échelle du stratifié

Opérateurs de perturbations stochastiques pour l'optimisation **qui satisfont les règles de drapage.**

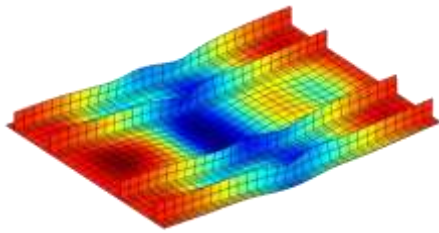
Principe général de construction des opérateurs

1. *Sélection d'un jeu de variables impactées*
2. *Énumération partielle des valeurs compatibles avec les règles de conception*
3. *Tirage aléatoire d'un jeu de valeurs admissibles*

Règles de drapage :

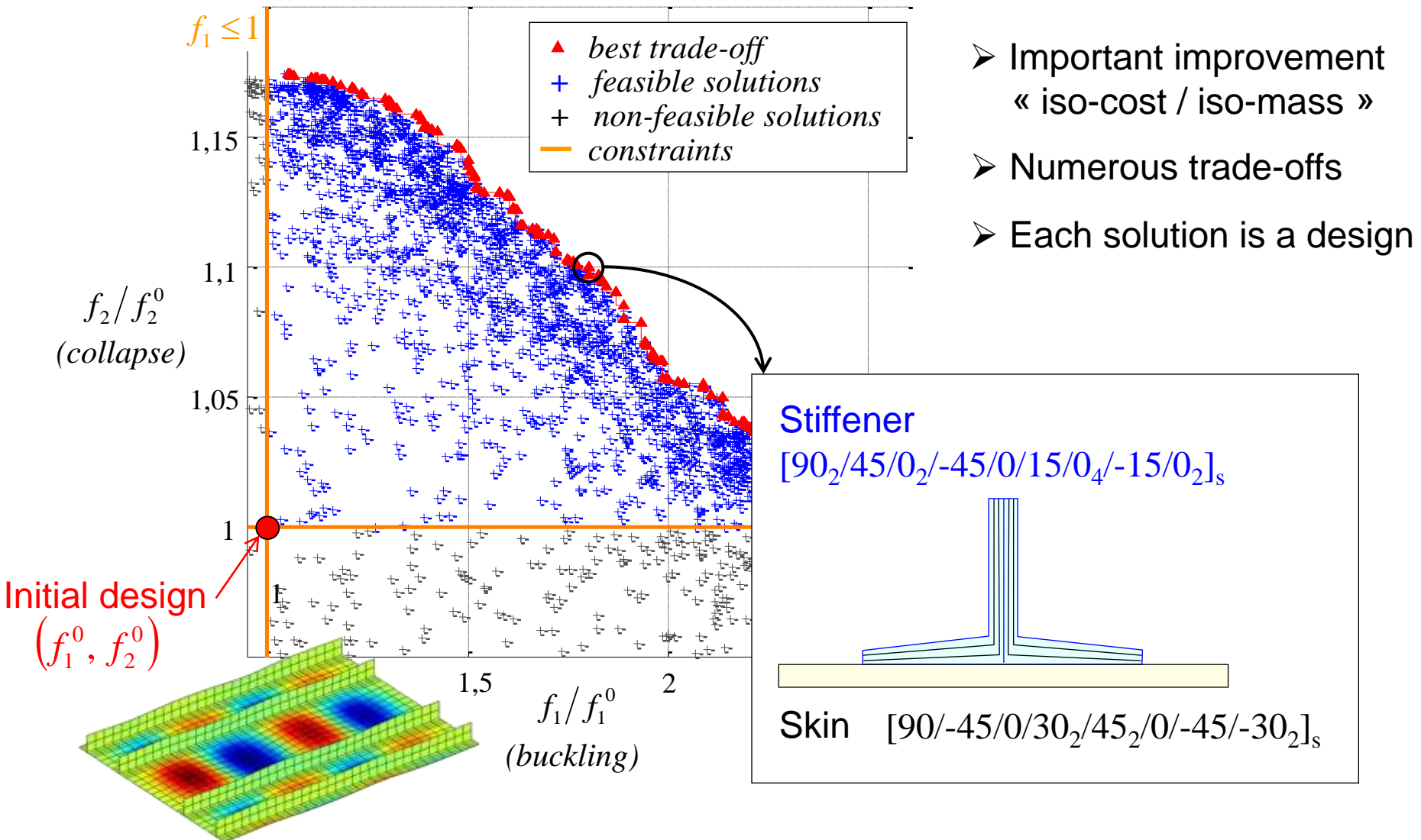
- orientations admissibles (par ex. $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$)
- ordre des plis (symétrie, groupage, désorientation, toldom)
- proportion des orientations (équilibre, 10%)

Opérateurs pour l'optimisation des empilements : mutation, permutation, croisement



Exemple 1 : optimisation évolutionnaire

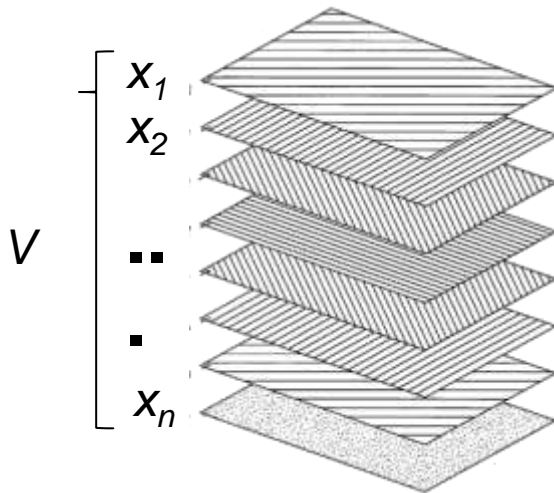
Optimisation bi-objectif d'un panneau raidi



- Important improvement
« iso-cost / iso-mass »
- Numerous trade-offs
- Each solution is a design

Approche multi-niveaux de variables et optimisation stochastique explicite

Déjà réalisé, à l'échelle du stratifié



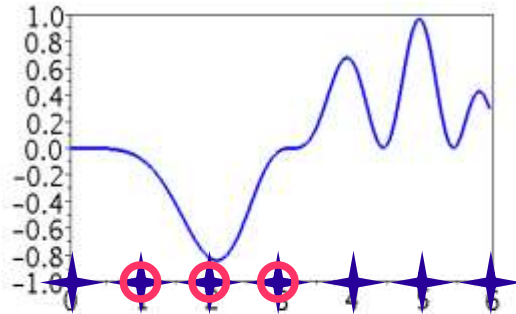
Optimisation jointe dans l'espace des orientations de fibres, x , et des paramètres de stratifications, V

→ **moins de variables, covariances entre plis gérées.**

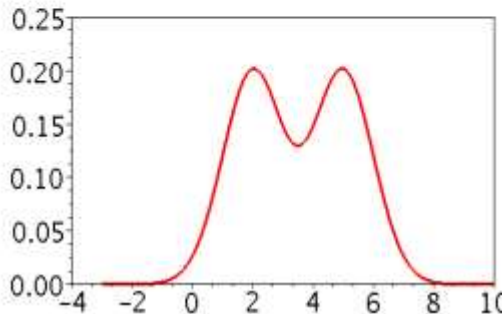
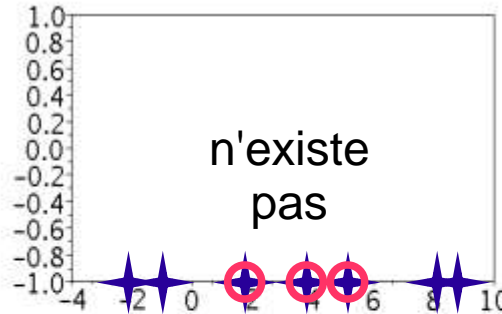
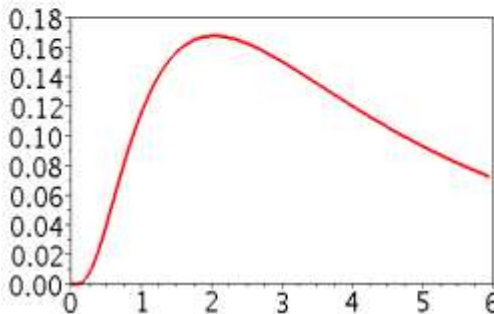
[Grosset, Le Riche and Haftka, A double-distribution statistical algorithm for composite laminate optimization, SMO, 2006]

Exemple 2 : optimisation avec double densité (1/2)

fonction coût



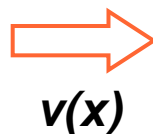
prob. de x^*



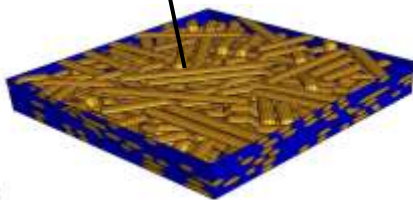
(DDOA,
Grosset, Le Riche et Haftka,
SMO 2006)

$$p_{DDOA}(x) \sim p_X(x) \cdot p_V(v(x))$$

x , orientations
des fibres



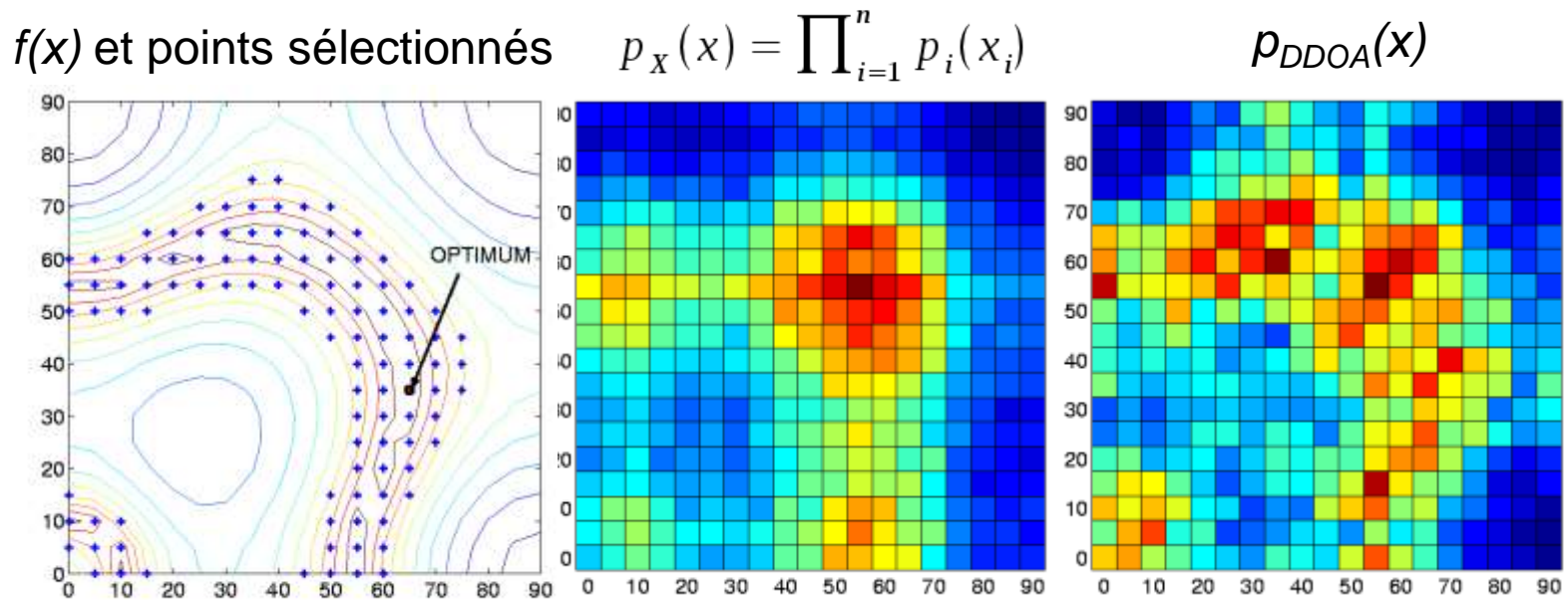
v , paramètres de
stratification (espace à faible
dimension)



- Un algorithme plus efficace.
- Un principe généralisable.

Exemple 2 : optimisation avec double densité (2/2)

$p_X(x)$ et $p_V(v)$ peuvent être des densités simples, avec variables aléatoires indépendantes (\rightarrow facile à identifier), mais $p_{DDOA}(x)$ est une densité couplée.

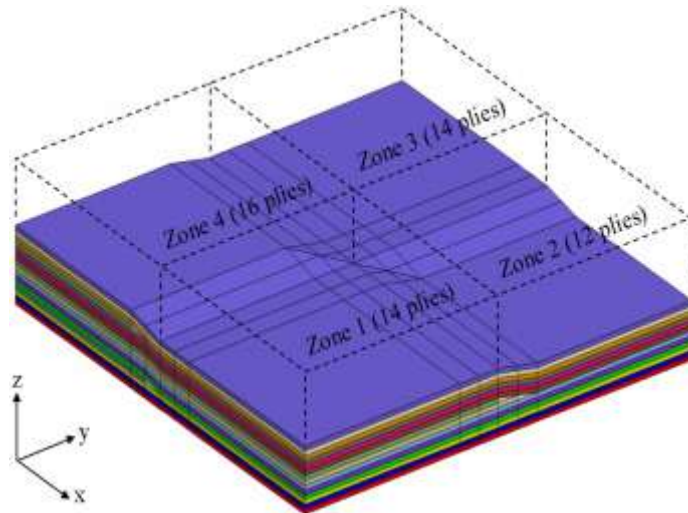


Une moitié de l'algorithme vit dans un espace de faible dimension.
DDOA peut être appliqué à d'autres problèmes (changer les v).

Un pas vers la structure : optimisation évolutionnaire et tables de drapage

Généralisation aux structures composites avec arrêts de plis. Opérateurs sur table de drapage.

Prise en compte des règles de drapage (6), des règles d'arrêts de plis (6) et des règles de continuité structurale (2)



12	13	14	15	16
45	45	45	45	45
90	90	90	90	90
-45	-45	-45	-45	-45
				0
-45	-45	-45	-45	-45
0	0	0	0	0
45	45	45	45	45
		90	90	90
	90	90	90	90
45	45	45	45	45
0	0	0	0	0
-45	-45	-45	-45	-45
				0
-45	-45	-45	-45	-45
90	90	90	90	90
45	45	45	45	45

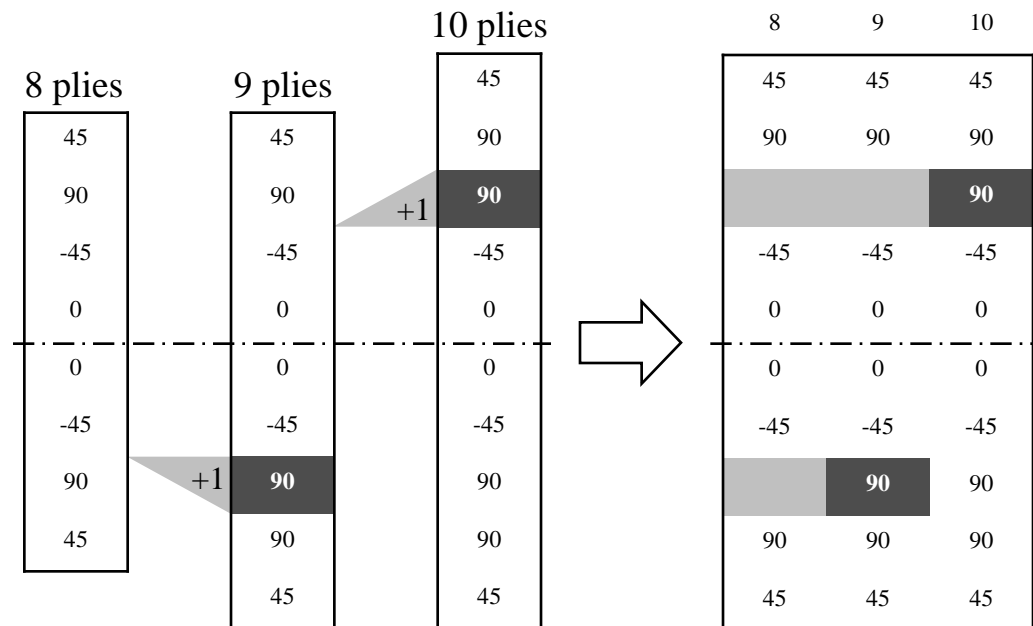
[A. Lasseigne, F.-X. Irisarri and R. Le Riche, *Optimal design of a composite structure relevant to laminate design guidelines*, ICCM19, 2013.]

[A. Lasseigne, F.-X. Irisarri and R. Le Riche, JNC18]

[F.-X. Irisarri, A. Lasseigne, F.-H. Leroy and R. Le Riche, *Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables*, soumis Composites & Struct., 2013.]

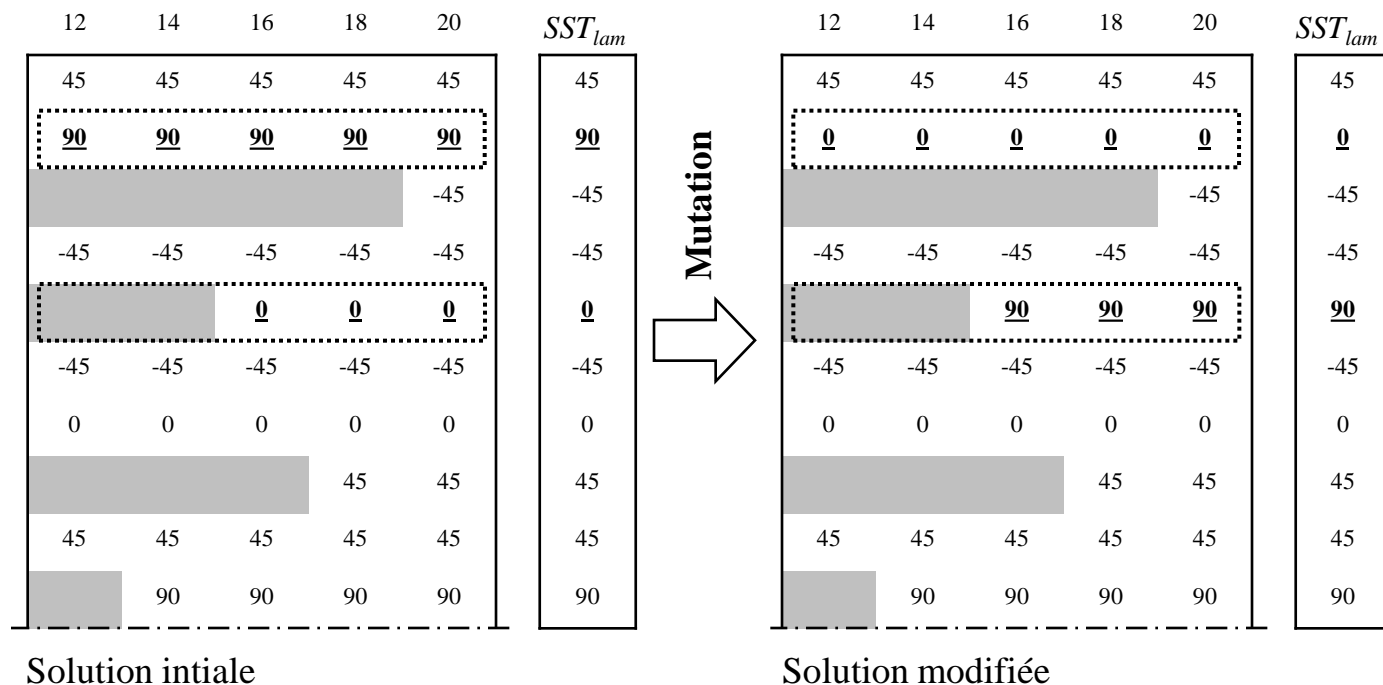
Un pas vers la structure : optimisation évolutionnaire et tables de drapage

Exemple 1 : génération d'une table de drapage (initialisation)



Un pas vers la structure : optimisation évolutionnaire et tables de drapage

Exemple 2 : l'opérateur de mutation



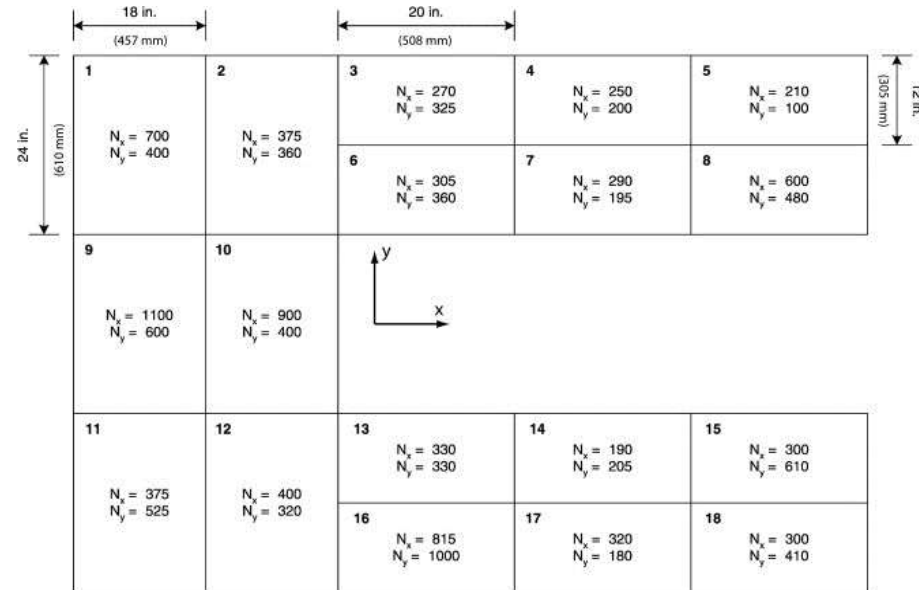
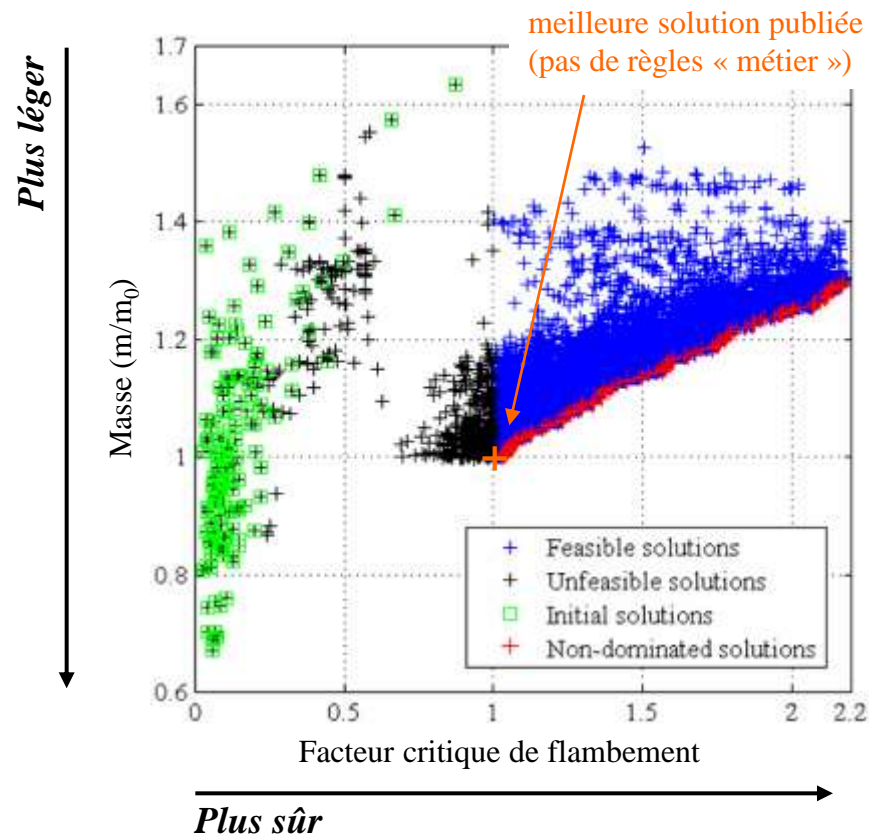
... et aussi permutation et croisement des tables et opérateurs des distribution d'épaisseur

Exemple 3 : laminate blending

Benchmark de type “capot d’hélicoptère”

(panneau en U subdivisé en 18 zones de 12 à 48 plis)

[Gürdal 2001, 2002, 2004, 2009]

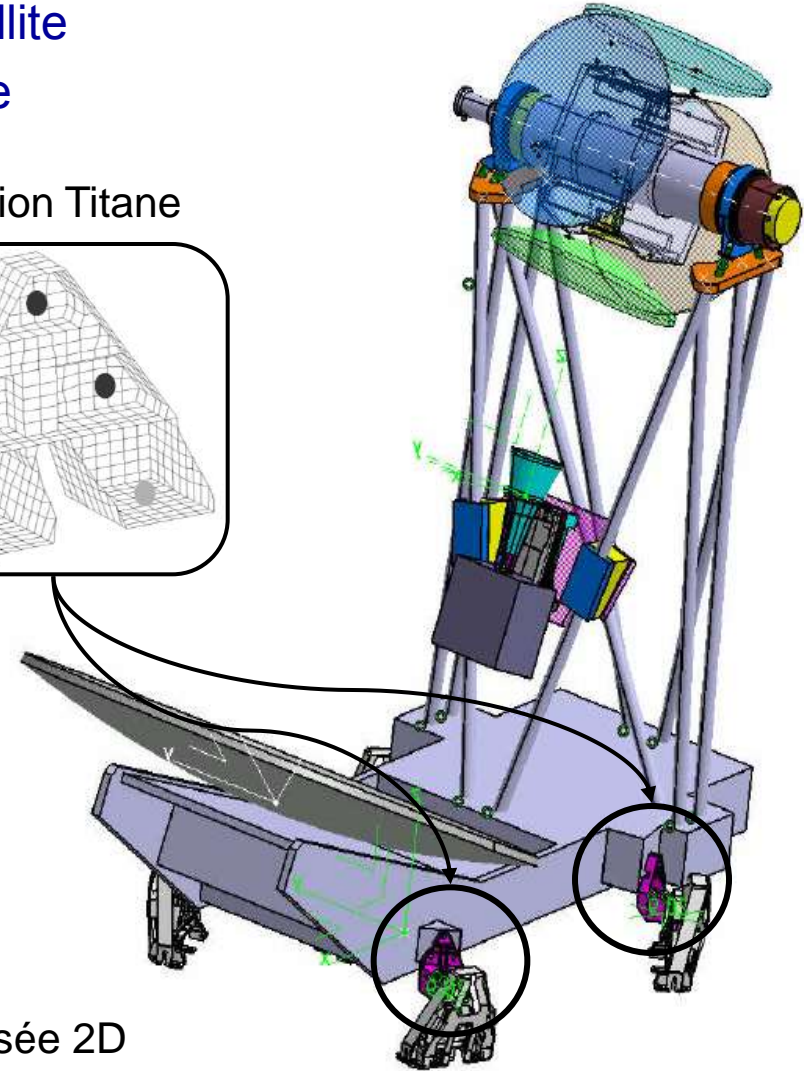
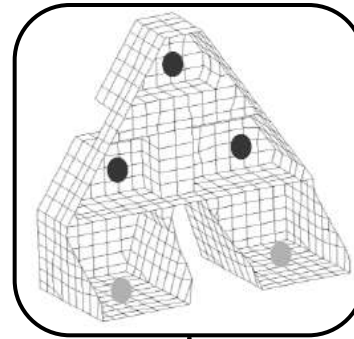


Exemple 4 : laminate blending

Conception d'une ferrure de pied d'antenne satellite
composite en remplacement d'une solution titane



Solution Titane



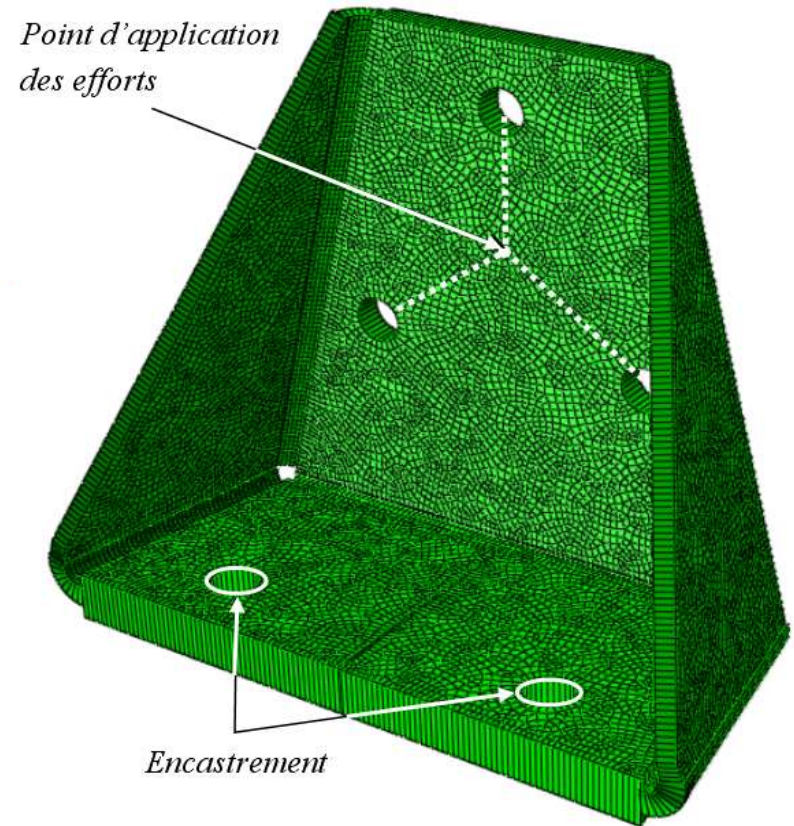
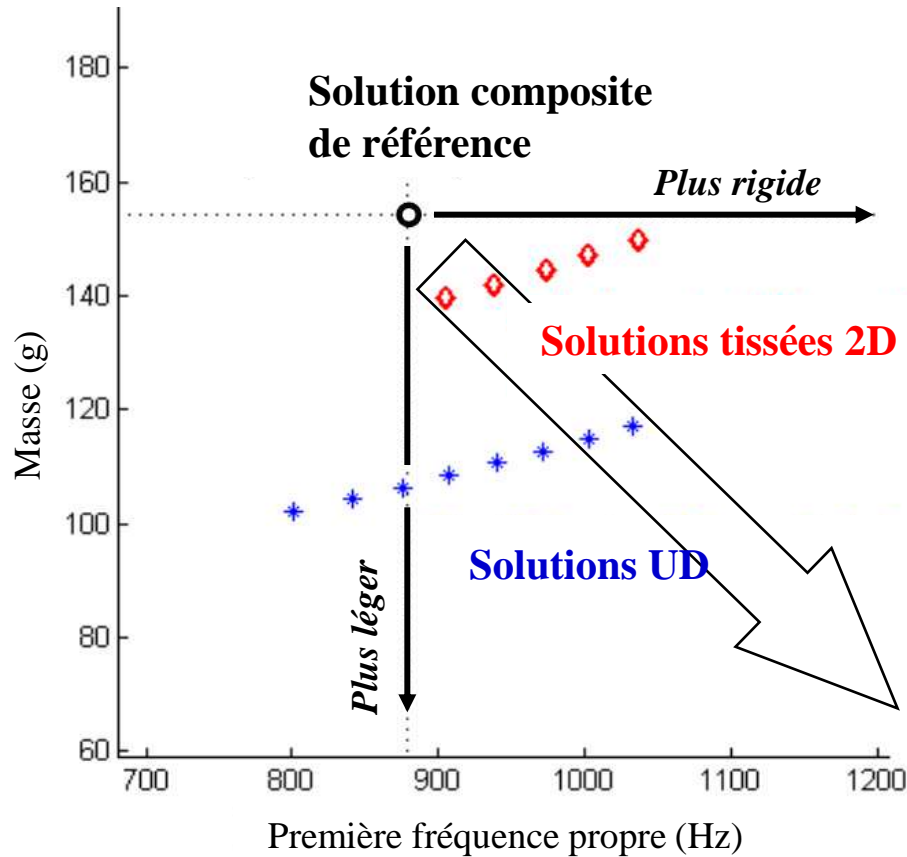
**Première solution
composite (pas
d'optimisation)**

Solution stratifiée tissée 2D

Gain de masse : 35%

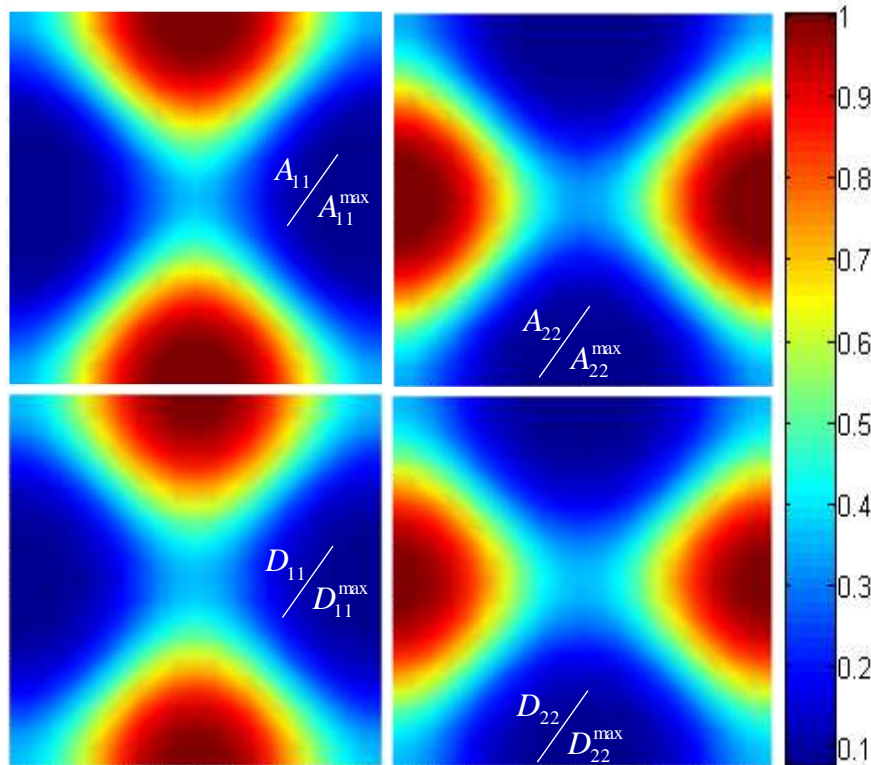
(150 g pour 230 g)

Exemple 4 : laminate blending

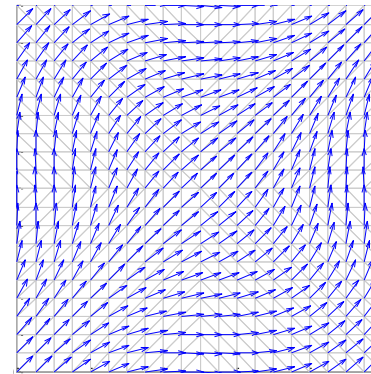


Faire varier le matériau en tout point de la structure : optimisation multi-niveau pour placement de mèches

1. Distribution optimale des rigidités macroscopiques (optimisation continue par gradients – pb. convexe)

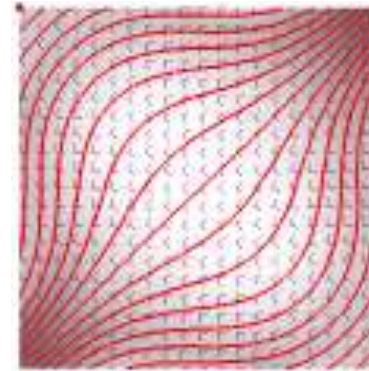


2. Distribution angulaire optimale (optimisation globale par AE)



Pli θ
Empilement $[(\pm\theta)_4]_s$

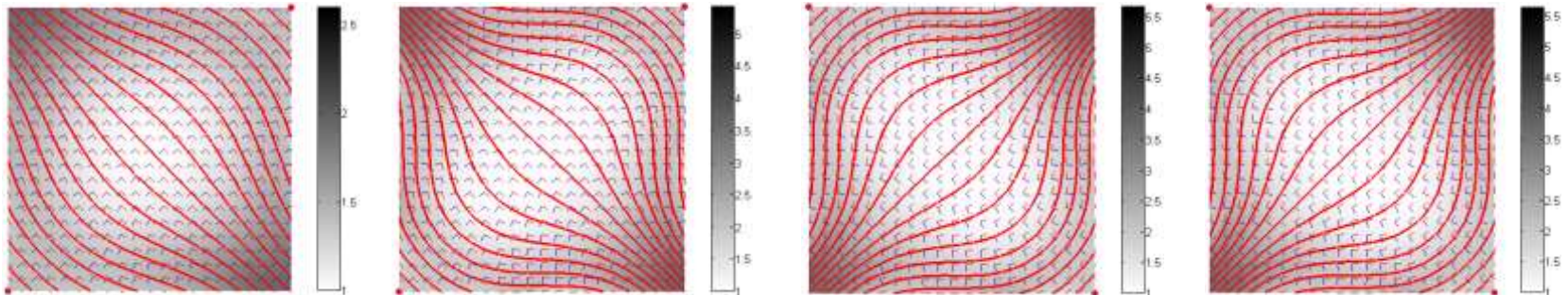
3. Chemin de fibre optimal sur un pli



Pli θ
Empilement $[(\pm\theta)_4]_s$

Exemple 5 : variable stiffness design

Empilements symétriques équilibrés à 16 plis : $[\pm\theta_1/\pm\theta_2/\pm\theta_3/\pm\theta_4]_s$

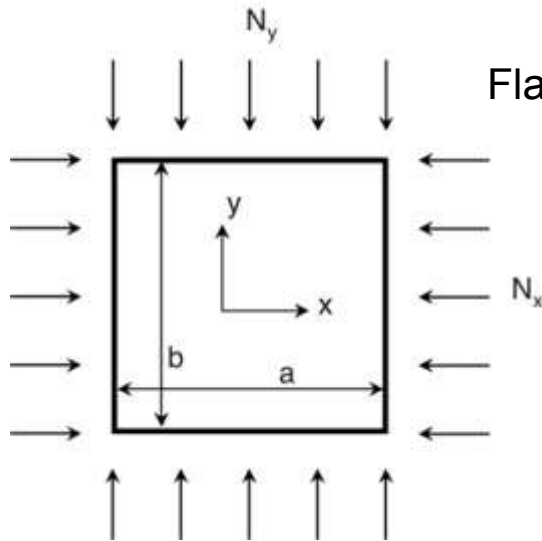


Pli 1

Pli 2

Pli 3

Pli 4



Flambement : gain 100% par rapport optimum à base d'UD

Collaboration avec TU-Delft

[F.-X. Irisarri, M.M. Abdalla, Z. Gürdal, *JNC17*, Poitiers, France, 2011]

[F.-X. Irisarri, M.M. Abdalla, Z. Gürdal, *ICCS16*, Porto, Portugal, 2011]

[F.-X. Irisarri, M.M. Abdalla, Z. Gürdal, *AIAA Journal*, 2011]

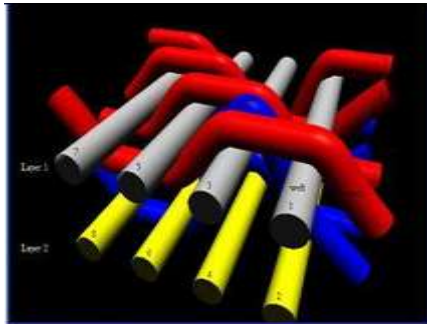
Perspectives : optimisation de structures et tissus 3D

En projet : Optimisation de structures en composites tissés 3D.

Impacts méthodologiques : optimisation de champs de variables (armures et modules), variables et contraintes définies à plusieurs niveaux.

→ **Vers une approche générale de l'optimisation de composites.**

trop de variables →
reste à l'échelle
du matériau,
modélisation
physique
détaillée
possible



Optimisation
dans les deux
espaces, lien
entre sous
problèmes à
des échelles
différentes



moins de
variables →
échelle de la
structure
possible. Mais
perte de certains
phénomènes
physique locaux
et perte de
fabricabilité

**Variables de
conception**

armure (géométrie), mèche
(matériau, taille), tensions des
mèches

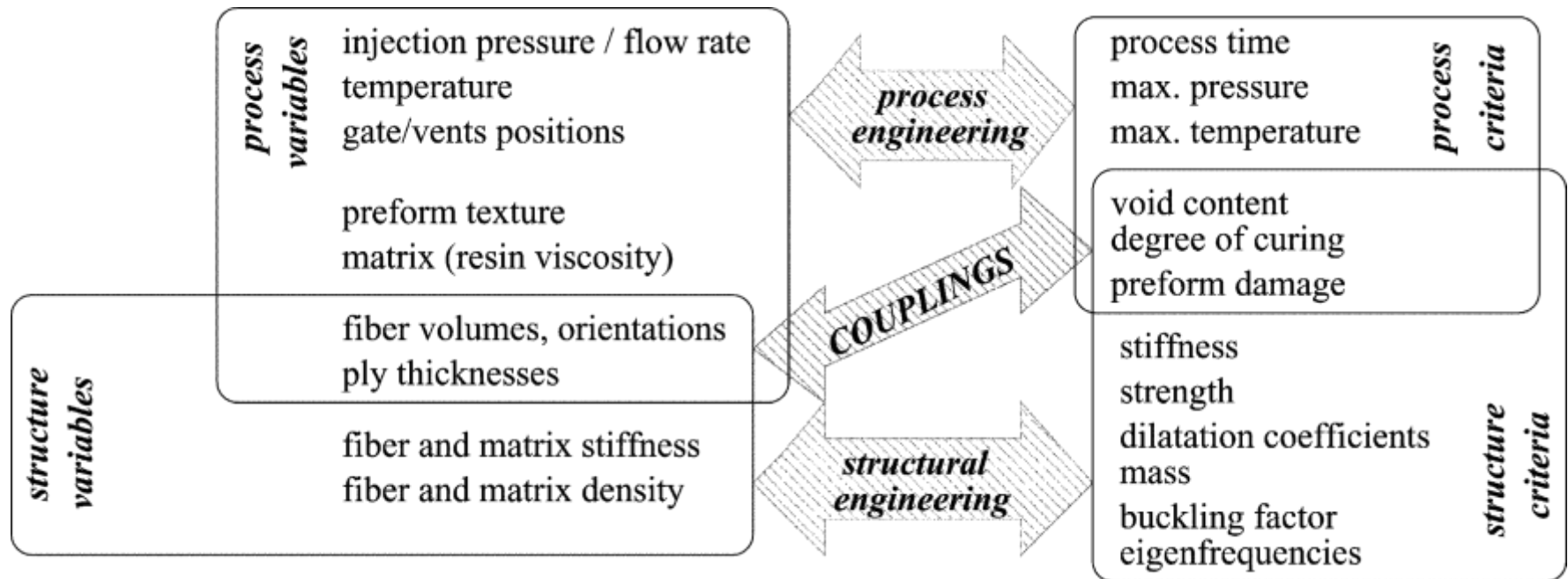
champ de modules
élastiques homogénéisés

Intégration du procédé de fabrication / conception

Nous avons déjà parlé des composites tissés.

Etude du couplage avec la fabrication par RTM à l'échelle du stratifié.

[Le Riche, Saouab and Bréard, Coupled compression RTM and composite layup optimization, Comp. Sc. & Techno, 2003]



Perspective : généralisation aux structures

Une réalisation récente pour l'automobile



Collaboration CETIM – ONERA – PSA - COMPOSE